

¹С.Р. Ігнатович, д-р техн. наук²В.Й. Орланов, канд. техн. наук³О.І. Чулак

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ НАНЕСЕННЯ НІТРИДНИХ ПОКРИТТІВ НА ЛОПАТКИ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Аерокосмічний інститут НАУ,
e-mail: ¹ignatovich @ nau.edu.ua.; ^{2,3}sad @ nau.edu.ua

Розглянуто покриття TiN на компресорних лопатках газотурбінних двигунів, що отримані за допомогою технологічної установки на плазових струменях капілярного імпульсно-періодичного плазмотрону. Проведено діагностику поверхні покриттів.

Вступ

Попадання піску та інших твердих частинок в проточну частину компресора призводить до газоабразивного зносу лопаток, що спричиняє зменшення коефіцієнта корисної дії компресора в цілому. Тому захист компресорних лопаток турбовальних двигунів від газоабразивного зносу відноситься до актуальних задач технологічного забезпечення якості процесу експлуатації авіаційної техніки.

Аналіз досліджень і публікацій

Для захисту лопаток компресорів від газоабразивного зносу в даний час застосовують, переважно, технологічні установки типу “Булат” та МАП-1, які працюють за принципом вакуумно-плазового нанесення плівок TiN на поверхню лопатки [1; 2].

Відомі розробки НПО “Вакууммашприбор” (Росія) по розробці серії плазмо-дугових джерел для нанесення покриттів [3].

Постановка завдання

Вказані установки мають різні вади, такі як енергоємність, висока ціна комплексу, мала продуктивність, невеликі товщини напilenня та ін.

Дана робота присвячена розробці технології отримання нітридів титану та їх нанесення на лопатки газотурбінних двигунів у повітрі при атмосферному тиску.

Теоретичні підходи до оцінок ефективності нітридних покриттів

У праці [2] автори висунули нову енергетичну теорію, яка описує кількісно працездатність компресорної лопатки з покриттям. В основу зв'язку зносостійкості композиції з внутрішньою енергією покриття взята експериментальна залежність:

$$\frac{q^{\text{нач}}}{q^{\text{т}}} = \left[\frac{\sigma_0^{\text{т}}}{\sigma_0^{\text{нач}}} \right],$$

де $q^{\text{нач}}$ і $q^{\text{т}}$ – питомі зноси зразків на початковому етапі і при нагріванні (до 350 °C) в умовах газоабразивного зносу [мг/г·см²]; $\sigma_0^{\text{нач}}$, $\sigma_0^{\text{т}}$ – відповідні значення макронапружень [МПа] при кімнатній та підвищеній температурі в шарі TiN, нанесеному на сталеву лопатку.

У зв'язку з цим вводиться енергетичний еквівалент зносостійкості, який являє собою енергію захищеного шару після зовнішньої дії на лопатку:

$$E_q = E_u + E_y \left(\frac{q^y}{q^y - q^{\text{нач}}} \right), \text{ при } E_y > E_u,$$

де E_u – пружна енергія, яка не призводить до зносу шару і $q \rightarrow 0$; E_y – енергія удару на лопатку; q^y – питомий знос після відповідного удару з енергією E_y .

Відомо, що теоретична енергія атомізації [4] для покриття TiN $E_{\text{т}}^{\text{TiN}} \approx 1200$ кДж/моль, тоді для розробників технології покриття і заданих умов експлуатації потрібно мати мету $E_q \rightarrow E_{\text{т}}^{\text{TiN}}$.

Величина E_q інтегрує в собі весь комплекс властивостей сплав-покриття: опір втоми, склад та структуру покриття, властивість сплаву основи і т. д.

До факторів, що призводять до зміни величини q^y в процесі газоабразивного зносу відносять умови вібрації та підігріву компресорних лопаток.

Отже, вказаний методичний підхід дозволяє прогнозувати працездатність композицій в реальних умовах експлуатації і шукати шляхи удосконалення конструкцій покриттів, формуючих захисний шар.

Отримання плазових струменів і порошоків металів при електричному вибуху в капілярі

У основу роботи схеми отримання TiN в повітрі при атмосферному тиску покладені фізичні процеси, які виникають при швидкому електричному вибуху проволочки в капілярі з отриманням порошку металу, повітряної та металевої плазми

і викидом продуктів через сопло в атмосферу [5–7], як це показано на рис. 1.

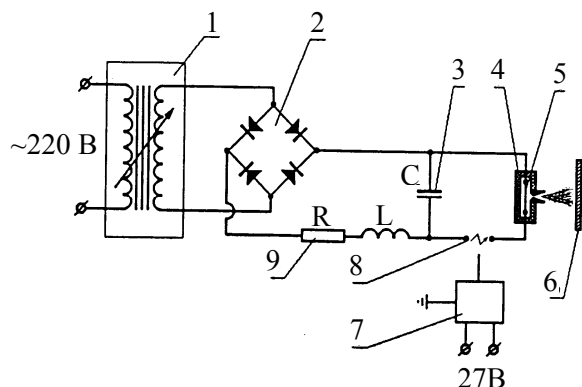


Рис. 1. Схема отримання плазових струменів з частинками порошку металу:

1 – високовольтний трансформатор; 2 – випрямлювач; 3 – конденсатор; 4 – капілярний плазмотрон; 5 – проволочка; 6 – мішень; 7 – підпалюючий пристрій; 8 – розрядник; 9 – зарядний опір

Розглянемо роботу такого генератора з позиції введення енергії в проволочку, яка знаходиться в закритому капілярному об'ємі з отвором для викиду продуктів вибуху.

Згідно з працею [5], критерієм отримання частинок з різним діаметром та хімічною природою є залежність від ступеня нагріву

$$\varepsilon = \frac{\omega}{\omega_s},$$

де ω – виділена енергія в проволочці:

$$(\omega = \int j^2 \rho / \gamma dt);$$

j – густина струму через проволочку; ρ – питомий опір; γ – щільність; t – час; ω_s – енергія сублімації матеріалу проволочки.

При $\varepsilon < 1$ частинки утворюються крапельним та конденсаційним шляхом, при $\varepsilon \gg 1$ основний механізм утворення порошків – на центрах конденсації (іонах плазми).

Одночасно на спектральну характеристику розсіювання розмірів частинок впливає хімічна активність плазми газу (повітря). В плазмі газу в капілярі та на виході плазового струменя ідуть реакції метал-іон, а також ідуть реакції іон метал-іон газу (кисень, азот).

Під час вибуху в капілярі піднімається тиск та температура. Характерний інтегральний час вибуху проволочки значно менший чим час витікання плазми із сопла. Це обумовлює прискорення імпульсної плазми в затопленому просторі. Значна кінетична енергія плазми спрямовується на мішень, де відбуваються процеси конденсації частинок порошків з виділенням енергії кристалізації та утворенням плівки металу.

У процесі експериментальних досліджень працездатності такої схеми було зафіксовано явище залишку значної кількості енергії, яку неможливо до кінця ввести в розряд. Це пов'язано з тим, що плазовий імпульс призводить до значного падіння тиску в капілярній камері і розряд зупиняється.

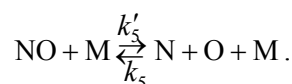
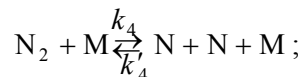
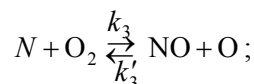
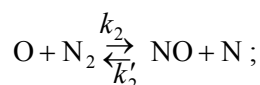
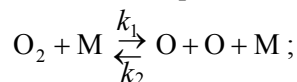
Розглянемо якісно процеси, які ідуть як в самому капілярі, так і при витіканні плазми в нерухоме повітря.

Хімічні реакції порошку титану в низькотемпературній плазмі з азотом та киснем в капілярному плазмотроні

На основі теоретичних досліджень [8], опишемо хімічні процеси, які реалізуються в випадку, коли в капіляр встановлюється титанова проволочка, яка вибухає.

При цьому ідуть процеси, пов'язані зі зміною розмірів крапель титану та хімічні реакції на поверхні. Одночасно ідуть реакції в плазмі як в капілярі, так і при витоку плазми в нерухоме повітря.

У роботі [8] показано, що в повітряній плазмі ідуть ланцюгові реакції вигляду:



Експеримент показав, що якщо середовище, де іде вибух титану, наповнити киснем, то утворюється TiO_2 і іде реакція $\text{O}_2 + \text{Ti} \rightleftharpoons \text{TiO}_2$ [5].

У нашому випадку додатково утворюється новий продукт TiN та іде реакція $\text{N} + \text{Ti} \rightleftharpoons \text{TiN}$. Отриманню і вивченню порошків металів присвячено подальші розділи статті.

Елементи експериментальної установки щодо отримання порошків на основі вибуху титанової проволочки

Технологічна установка з отримання плівок металів на мішені частково описана в праці [5]. Розглянемо більш детально роботу вибухової камери цієї установки.

На рис. 2 наведено основні вузли камери.

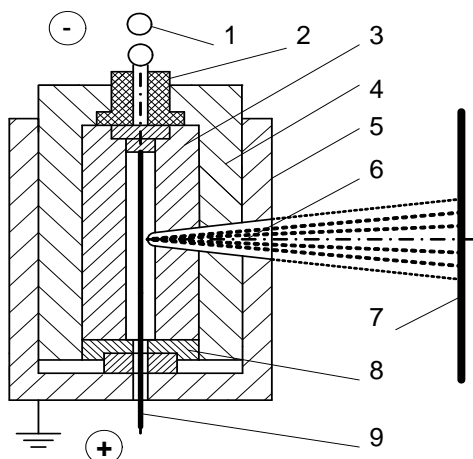


Рис. 2. Вибухова камера:

1 – розрядник; 2 – ізолятор; 3 – діелектричний корпус;
4 – корпус камери; 5 – зовнішній корпус; 6 – сопло;
7 – мішень; 8 – ущільнююча шайба; 9 – проволочка

Робоча камера виконана із порцеляну, що зменшує кількість домішок при вибуху матеріалу, який попадає в плазму. В установці використовувалась камера з відношенням довжини до діаметра капіляра рівним 10, а діаметр проволочки титану – $0,35 \cdot 10^{-3}$ м.

Для герметичності камера капіляра стягується двома стаканами. Проволока 9 вводиться в розрядну камеру з мінімальним зазором.

Технологічний процес нанесення нітридних покриттів на лопатки компресорів та турбін

Взаємодія потоку іонізованих парів та частинок металу з тілом лопаток компресора супроводжується конденсацією металу на поверхні лопатки.

У процесі дослідження лопатка компресора розміщувалась на відстані $(30 \dots 40) \cdot 10^{-3}$ м від зрізу сопла.

Перед напиленням лопатка компресора проходила процес очищення соляною кислотою та дистильованою водою.

Залежно від енергії, яка вводилась в розрядний канал, ступінь розширення сопла ($F = 3$) дозволяв отримувати діаметр напилення до $(8, \dots 15) \cdot 10^{-3}$ м. Були проведені дослідження по напиленню нітриду титану також на поверхню турбінних лопаток.

У ручному управлінні установкою виконуються такі технологічні операції. Титанова проволочка заправляється в капіляр і перевіряється гальванічний контакт між електродами. Далі виконується операція по герметизації капіляра. Розрядна камера виставляється над лопаткою на заданій висоті, вмикається блок високої напруги і автомат підключає навантаження до батареї конденсаторів. Далі відключається високовольт-

ний блок і гальванічно відключається блок конденсаторів. Оператор дистанційно замикає розрядник. Виникає розряд на проволочці. Потоки плазми вилітають на лопатку компресора. На цьому цикл нанесення плівки закінчується.

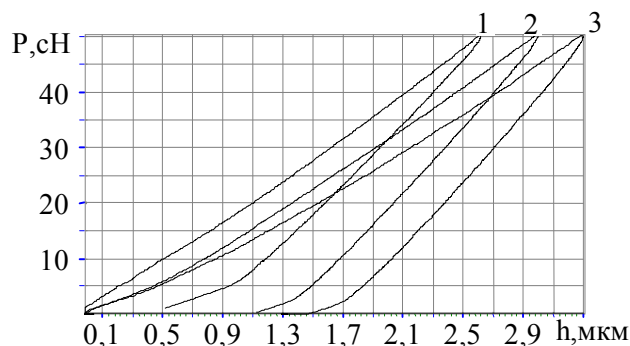
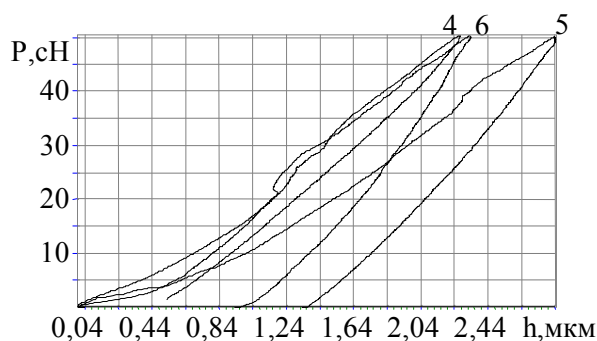
Діагностика й аналіз якості нанесених нітридних покриттів

Дослідження фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів, що напиляються, здійснювалось за допомогою приладу МІКРОН-ГАММА методом безперервного вдавлювання індентора.

Метод базується на автоматичній реєстрації навантаження P на індентор та глибини h його проникнення.

Результати подаються у вигляді діаграм навантаження $P = f(h)$, автоматична обробка яких дозволяє в реальному масштабі часу отримати не тільки більш широкую, а також і принципово нову інформацію. Це відкриває широкі перспективи в дослідженні фізико-механічних властивостей матеріалів.

Результати вимірювання мікротвердості напилення, нанесених за допомогою капілярного імпульсно-періодичного плазмотрону та на заводській установці “Булат”, наведені на рис. 3–5 та в таблиці.

Рис. 3. Діаграма навантаження лопатки компресора:
1, 2, 3 – номер вимірювання мікротвердості напиленняРис. 4. Діаграма навантаження напилення
Ti + TiN на лопатку компресора:
4, 5, 6 – номер вимірювання мікротвердості напилення

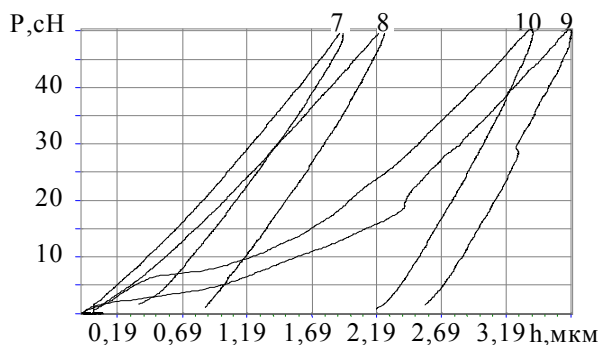


Рис. 5. Сумісна діаграма навантаження напilenня TiN на лопатку компресора, виконаного по заводській технології:

7, 8, 9, 10 – номер вимірювання мікротвердості напilenь

**Результати дослідження
фізико-механічних властивостей матеріалів
($P = 50 \text{ cH}$, $V = 5,00 \text{ mm/c}$, $T = 0$)**

Номер ви- мірю- вання	h, мкм	Н ₀ , ГПа	Е, ГПа	S1	S2	Н _а , ГПа
1	2,63	6,068	37,6	64,55	44,46	7,555
2	3,02	3,509	30,3	63,96	40,19	4,368
3	3,31	2,451	26,9	75,3	38,63	3,052
4	2,27	9,396	50,2	48,77	40,85	11,69
5	2,84	3,170	37,5	58,96	32,74	3,946
6	2,33	4,647	56,3	53,72	28,5	5,786
7	1,93	13,72	69,8	46,10	34,55	17,08
8	2,25	6,321	54,7	52,54	31,43	7,869
9	3,69	1,628	25,0	64,23	25,13	2,027
10	3,40	1,710	34,1	66,71	25,58	2,129

Висновки

1. Проведено напilenня евтектики Ti + TiN на поверхню пера лопатки компресора високого тиску двигуна Д-36 в повітрі при атмосферному тиску.

2. Аналіз результатів випробувань показує, що при вакуумному напilenні TiN на установці "Булат" мікротвердість поверхні пера лопатки Н_а, Н₀ збільшується в 1,72 рази, модуль пружності Е поверхневого шару – в 1,5 рази.

3. У разі напilenня евтектики Ti + TiN з використанням капілярно-імпульсного плазматрона мікротвердість поверхні пера лопатки Н_а, Н₀ збільшується в 1,43 рази, модуль пружності Е поверхневого шару – в 1,52 рази.

Список літератури

1. Копилов А.А., Стяжкин В.А., Векслер и др. К оценке эффективности нитридных покрытий для компрессорных лопаток газотурбинных двигателей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2002. – Т. 68, № 2. – С. 40–44.
2. Стежкин В.А., Копылов А.А., Палеева С.Я. Вакуумно-плазменные покрытия системы Ti-N для компрессорных лопаток турбин // Защита металлов. – 2000. – Т. 36, № 3. – С. 328–330.
3. Гринченко В.Т., Ивановский Г.Ф. Дуговой разряд в вакууме – альтернатива гальваническому напылению покрытий // Вест. АТН РСФСР. – 1991. – №3. – С. 19.
4. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. Тугоплавкие соединения: Справ. – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.
5. Валевиц В.В., Седой В.С. Получение высокодисперсных порошков при быстром электрическом взрыве // Изв. вузов. Физика. – 1998. – № 6. – С. 70–76.
6. Истекающие в атмосферу дозвуковые плазменные струи, образуемые капиллярным разрядом / А.П. Ершов, В.В. Розанов, Н.Н. Сысоев и др. // Прикл. физика. – 1995. – № 2. – С. 36–50.
7. Структурно-энергетические процессы при электрическом взрыве проводников / А.П. Ильин, О.Б. Назаренко, Д.В. Тихонов и др. // Изв. вузов. Физика. – 2002. – № 2. – С.31–34.
8. Кинетика и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме. – М.: Наука, АН СССР, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева. 1965. – 253 с.
9. Орланов В.И. Получение металлических пленок в технологической установке на капиллярном плазматроне // Вест. двигателестроения. – 2002. – № 1. – С. 132–134.

Стаття надійшла до редакції 30.04.04.

С.Р. Игнатович, В.И. Орланов, О.И. Чумак

Разработка технологии нанесения нитридных покрытий на лопатки газотурбинных двигателей

Рассмотрены покрытия TiN на компрессорных лопатках газотурбинных двигателей, полученные с помощью технологической установки на плазменных струях капиллярного импульсно-периодического плазматрона. Проведена диагностика поверхности покрытий.

S.R. Ignatovich, V.I. Orlanov, O.I. Chumak

Development of technology of nitride films manufacture for blades of gas turbine engines

Films of TiN on compressor blades of gas turbine engines are considered. Films are obtained with using plasma jet coater of capillary pulse-periodical plasmatrone. Diagnostics of films surface are performed.